



**CHKT**

# **Svaz chladicí a klimatizační techniky**

**Ing. Jan Sedlář**

**Matematický model chladicího zařízení  
s odtáváním výparníku**

**ODBORNÁ KONFERENCE SCHKT- 26. LEDNA 2016, HOTEL STEP, PRAHA**



# Univerzitní Centrum Energeticky Efektivních Budov – UCEEB

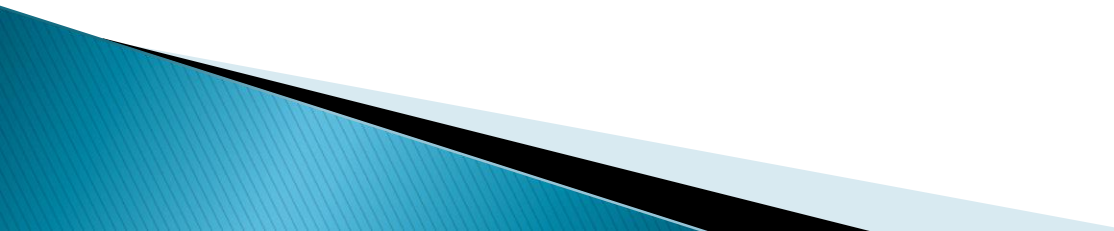
- ▶ Vývoj v oblasti budov
  - Udržitelná výstavba
  - Nové technologie vytápění/chlazení
- ▶ Spolupráce čtyř fakult
  - Stavební
  - Strojní
  - Elektrotechnická
  - Biomedicínská
- ▶ Mezioborové disciplíny
- ▶ Moderní laboratoře
  - Laboratoř Alternativních technologií
    - solární systémy + tepelná čerpadla



# Matematické modelování

- ▶ Předpověď provozního chování
  - Mezní stavy
  - Dimenzování výměníků
  - Volba kompresoru
- ▶ Regulace
  - Prediktivní regulace
    - Nastavení akčních členů do ideální polohy
- ▶ Predikce *SEER* nebo *SCOP*

# Pokročilé řízení a optimalizace provozu tepelných čerpadel

- ▶ Grant TAČR
  - ▶ Příjemce: **HoneyWell, spol. s r.o.**
  - ▶ Další účastník: Fakulta strojní ČVUT
  
  - ▶ Doba řešení: 2013 – 2015
  
  - ▶ Cíl projektu: Vývoj prediktivního regulátoru pro řízení tepelných čerpadel
- 

# Pokročilé řízení a optimalizace provozu tepelných čerpadel

- ▶ Cíl práce na Fakultě strojní  
Příprava a testování modelů jednotlivých komponent tepelného čerpadla
- ▶ Komponenta:
  - Kompresor
  - Kondenzátor
  - Výparník

# Chladicí zařízení x tepelné čerpadlo

- ▶ Stejně komponenty
  - Oběh chladiva
  - Kompresor
  - Kondenzátor
  - Výparník
  - Expanzní ventil
- ▶ Různé teplotní hladiny užitečného tepla/chladu

# Rozdíly

## ▶ Tepelné čerpadlo

- Ustálená teplota kondenzační
  - Vytápění a příprava teplé vody
- Proměnná teplota vypařovací
  - S venkovní teplotou a pracovní obálkou kompresoru
- Chladiva
  - S velkým podílem tepla v přehřátých parách
  - R410a, R32, R407c
- Konstrukční typy
  - Kompakt x split
  - Nadkritický x podkritický oběh
  - Jednostupňový kompresor x EVI kompresor



# Rozdíly

## ▶ Chladicí zařízení

- Ustálená teplota vypařovací
  - Chlazení technologie, potravin, klimatizace atd.
- Proměnná teplota kondenzační
  - S venkovní teplotou a pracovní obálkou kompresoru
- Chladiva
  - R134a, R407f, HFO, R744, atd.
- Konstrukční typy
  - Podle účelu, chladiva, pracovního rozdílu teplot, doby provozu atd.

# Chladicí zařízení x tepelné čerpadlo

- ▶ Stejný princip pracovního oběhu chladiva
- ▶ Z hlediska modelování zaměnitelná zařízení

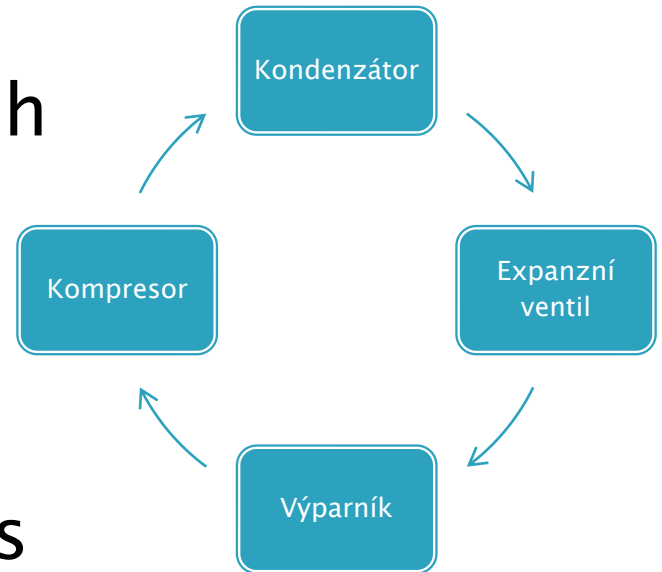
# Matematické modelování

## ▶ Modelování po komponentách

- Kompresor
- Kondenzátor
- Expanzní ventil
- Výparník

## ▶ Propojení přes chladicí cyklus

- Iterační proces hledání rovnováhy
  - $\text{Energie přivedená} = \text{energie odvedená} = \text{energie předaná}$



# Model chladiwa

Vychází ze stavové rovnice reálného plynu

- ▶ Stavová rovnice

- Ideální plyn x reálný plyn

$$pV = nRT$$

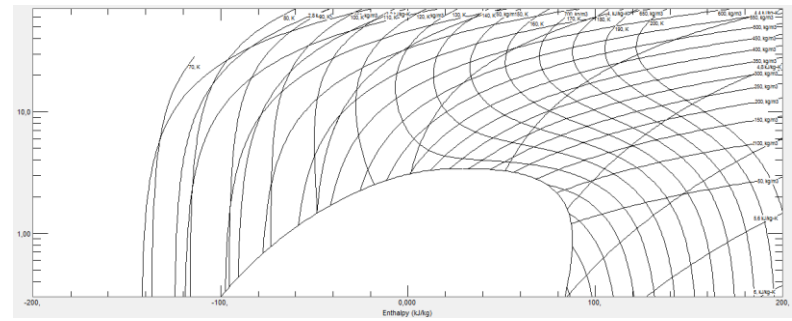
- ▶ Van der Waalsova

$$\left(p + n^2 \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$$

- ▶ Peng Robinsonova

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{2\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$

# Model chladiva



## Konstanty charakterizující chladivo

- ▶ Molární hmotnost
- ▶ Kritický tlak a teplota
- ▶ Faktor excentricity molekuly
- ▶ Měrná tepelná kapacita ideálního plynu

$$c_{p,id} = f(T)$$

Pomocí stavové rovnice lze dopočítat jednotlivé stavové veličiny

- Teplota, tlak, hustota, entalpie, entropie, kompresibilita atd.

# Model kompresoru

Parametrizace  
kompresoru z údajů  
od výrobce

S řízením otáček

- Charakteristika kompresoru
- Celková izoentropická účinnost  $\mu_{ie} = f(\sigma, n, T_s, T_v, p_s, \dots)$
- Dopravní součinitel  $\lambda_{id} = f(\sigma, n, T_s, T_v, p_s, \dots)$
- Tepelné ztráty ochlazováním skříně

Použitý model

$$V_{teor\_ot} = C_1 \cdot n^3 + C_2 \cdot n^2 + C_3 \cdot n + C_4$$

$$\lambda_d = 1 - C_5 \cdot (\sigma - 1)$$

$$\dot{m} = V_{teor\_ot} \cdot n \cdot \lambda_d \cdot \rho_s$$

Hustota chladiva  
Na sání kompresoru

Otáčky

Zdvih

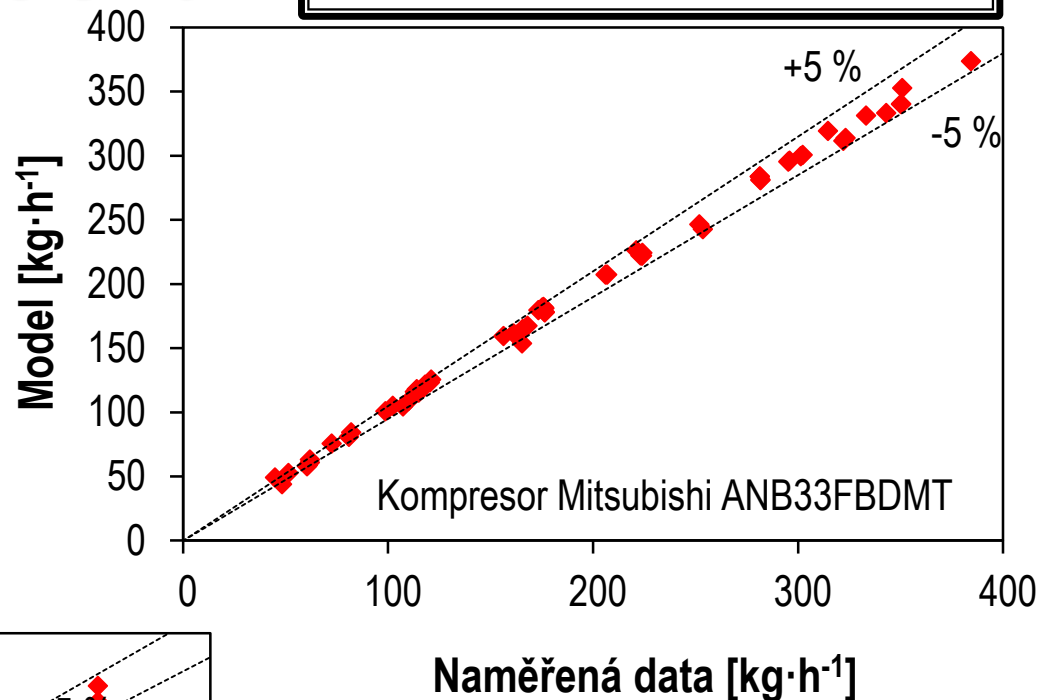
$$\eta_{c,ie} = D_1 + D_2 \cdot n + D_3 \cdot n^2 + D_4 \cdot \phi + D_5 \cdot \phi^2 + D_6 \cdot n \cdot \phi + D_7 \cdot p_k$$

$$\phi = \sigma^{1/n_s}$$

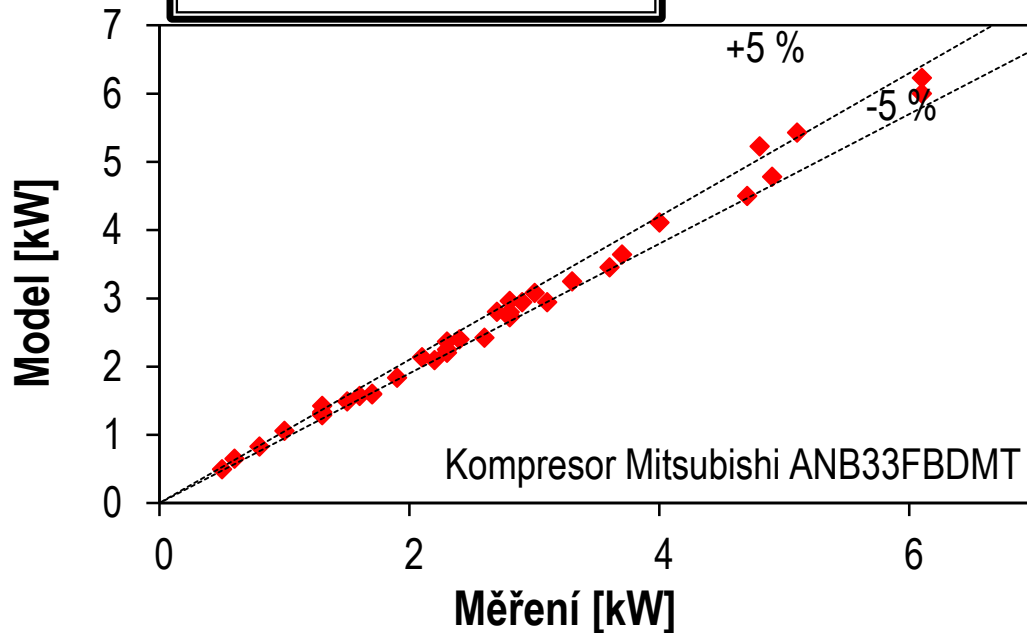
# Model kompresoru

- ▶ parametrizace kompresoru Mitsubishi
  - Scroll s řízením otáček

Hmotnostní průtok chladiva



Příkon kompresoru



# Model expanzního ventilu

Předpoklad:

- ▶ Expanze chladiva probíhá adiabaticky (nesdílí se u ní teplo, nekoná se práce)

Předpoklad platí pro expanzní ventily umístěné na vstupu chladiva do výparníku



Zdroj: <http://www.danfoss.com>



# Model kondenzátoru

V kondenzátoru probíhají současně tři děje:

- ▶ Chlazení přehřátých par chladiva
- ▶ Kondenzace
- ▶ Podchlazování

Kondenzátor je charakterizován

- ▶ Velikostí teplosměnné plochy  $A$  – konstanta
- ▶ Součinitelem prostupu tepla  $U$  – mění se

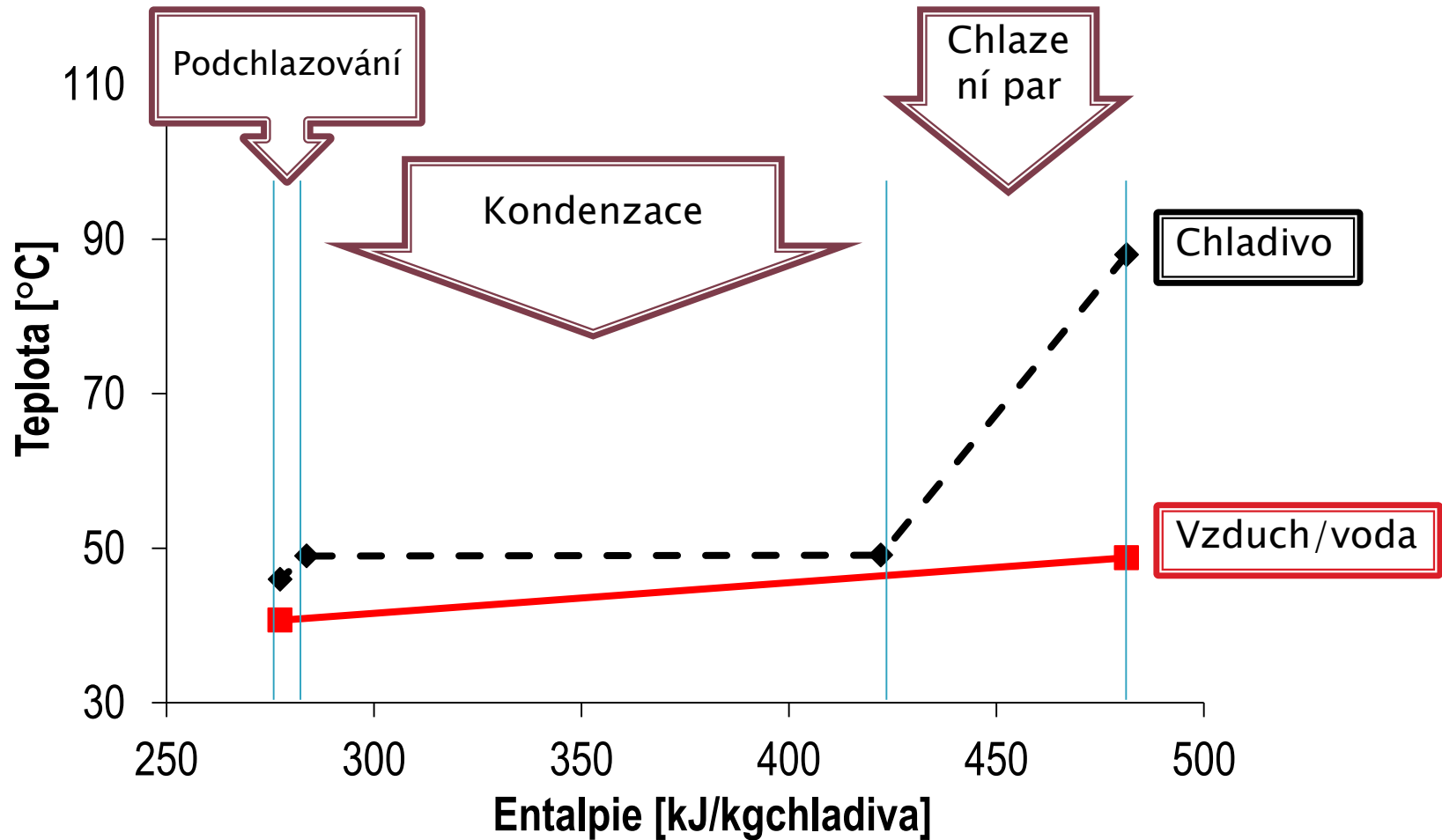
Model kondenzátoru iteračně hledá pro

- ▶ Médium na sekundární straně:  $\dot{m}_k, c_p, t_{k,in}$
- ▶ Chladivo:  $\dot{m}_{ch}, t_{ch,in}, p_k$

Rovnost: teplo přivedené = teplo odvedené = teplo předané



# Kondenzátor – průběh teplot



# Model výparníku obecně

Ve výparníku probíhají současně dva děje:

- ▶ Vypařování kapalného chladiva
- ▶ Přehřívání par chladiva

Výparník je charakterizován

- ▶ Velikostí teplosměnné plochy  $A$  – konstanta
- ▶ Součinitelem prostupu tepla  $U$ 
  - Mění se vlivem změny průtoku chladiva/vzduchu, namrzání vzdušné vlhkosti apod.

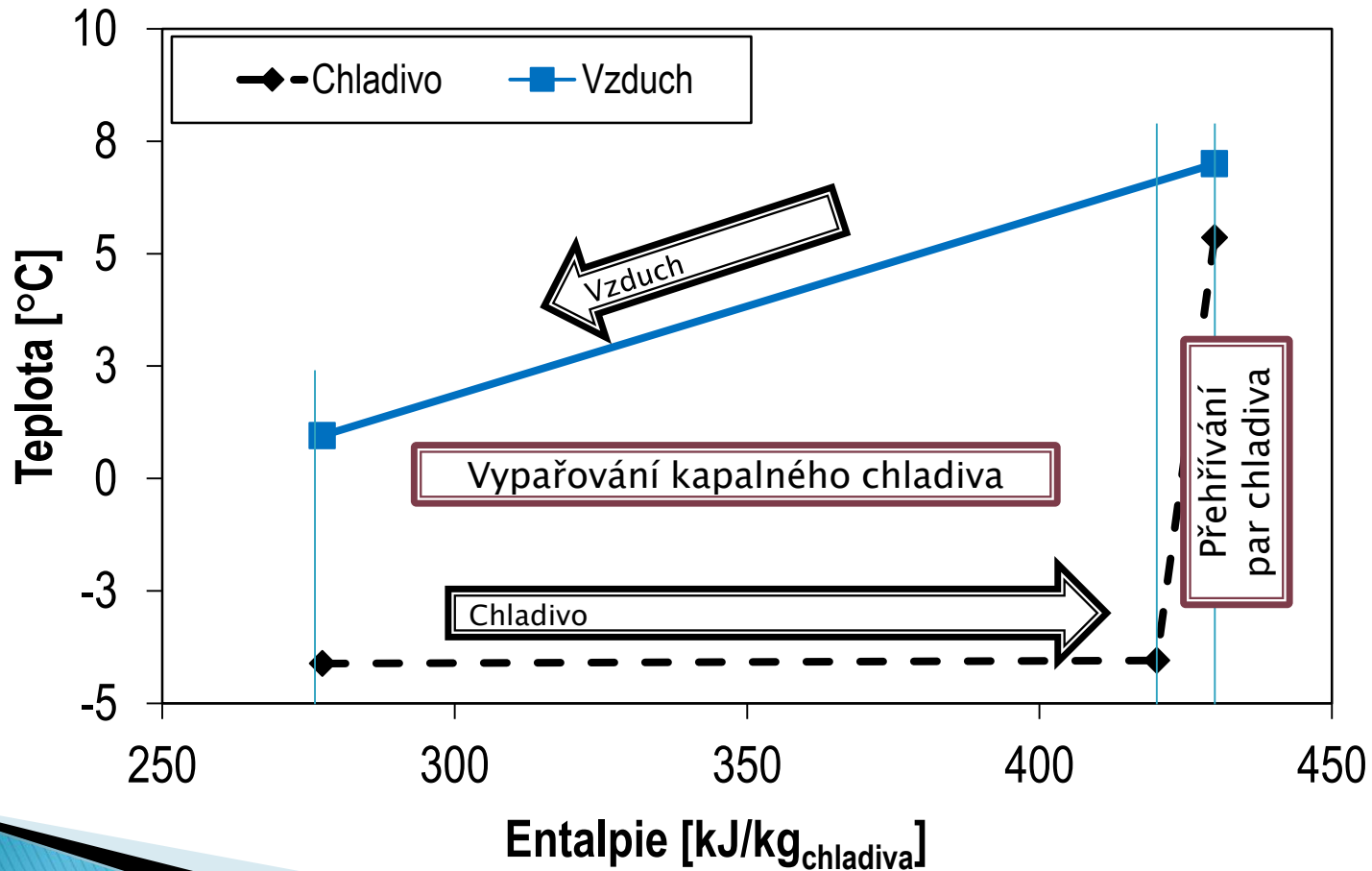


Model kondenzátoru iteračně hledá pro

- ▶ Médium na sekundární straně:  $\dot{m}_v, c_p, t_{v,in}$
- ▶ Chladivo:  $\dot{m}_{ch}, t_{ch,in}, p_v$

Rovnost: teplo přivedené = teplo odvedené = teplo předané

# Výparník – průběh teplot



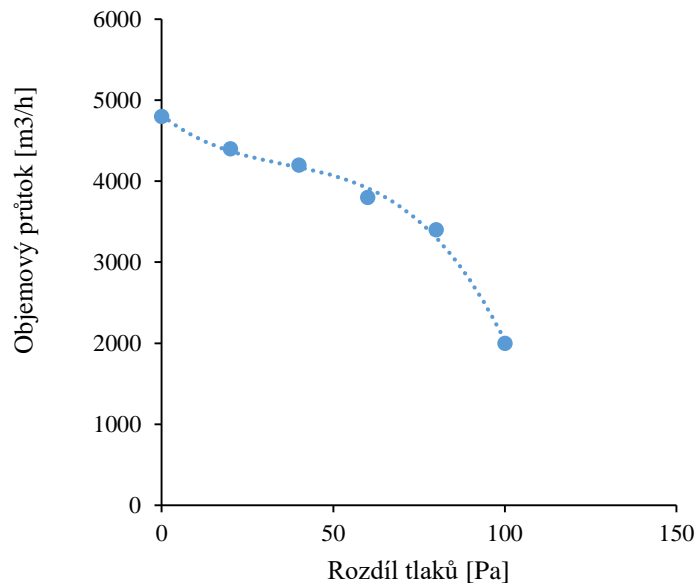
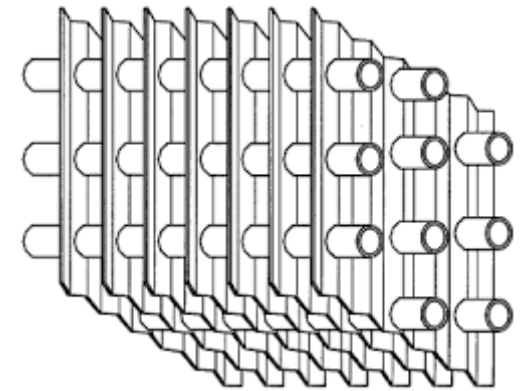
# Model výparníku – výzvy

## Problémy při modelování výparníku

- ▶ Kondenzace/namrzání vzdušné vlhkosti
  - Odvod citelného i latentního tepla ze vzduchu
  - Nestacionární jev
- ▶ Fyzikální vlastnosti námrazy
  - Mění se s povrchovou teplotou i časem
- ▶ Křížové proudění
- ▶ Tlaková ztráta

# Model výparníku – vstupy

- ▶ Geometrie teplosměnné plochy
  - Rozteč lamel, vnější rozměry, tloušťka stěn, rozteč a uspořádání trubek atd.
- ▶ Model ventilátoru



Zdroj: [www.ventilatory-prodej.cz](http://www.ventilatory-prodej.cz)

# Model výparníku – vstupy

- ▶ Uspořádání okruhu chladiva
  - Počet větví (podle rozvaděče chladiva)
  - Počet trubek za sebou
  - Počet trubek nad sebou



# Logika výpočtu výparníku

Vliv nerovnoměrného namrzání vlhkosti

- ▶ Modelování výparníku po segmentech
  - Jeden segment odpovídá jedné trubce s chladičem
- ▶ Vychází se z modelu
  - Přestupu tepla (autor Vampola – SVÚSS Běchovice)
  - Moliérův  $h-x$  diagram
  - Prostup tepla přes rovinnou stěnu
  - Fyzikální vlastnosti námrazy

Hledá se shoda mezi teplem odvedeným chladičem, teplem pro ochlazení vzduchu + zkondenzování vlhkosti a předaným přes teplosměnnou plochu



# Model chladicího zařízení: výstupy

- ▶ Termodynamické stavy chladiva v jednotlivých provozních stavech
- ▶ Teplotní profily na jednotlivých výměnících
- ▶ Průběh teplot podél teplosměnné plochy výparníku
- ▶ Parametry kompresoru
- ▶ Vnější vlastnosti zařízení
  - Chladicí výkon
  - Příkon
    - Kompresor, ventilátor, další zařízení (čerpadla, regulace)
  - Chladicí, topný faktor

# Příklad

- ▶ Výparník chladí vzduch z teploty  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Relativní vlhkost vzduchu na vstupu je 98 %.
- ▶ Otáčky ventilátoru se nemění

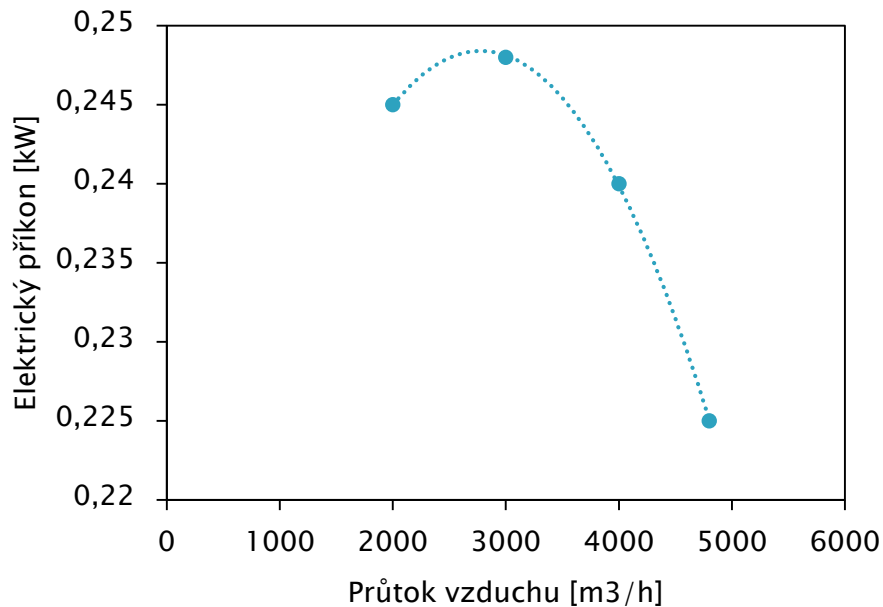
Jak se mění chladicí výkon výparníku při namrzání?

# Výparník – rozměry a uspořádání

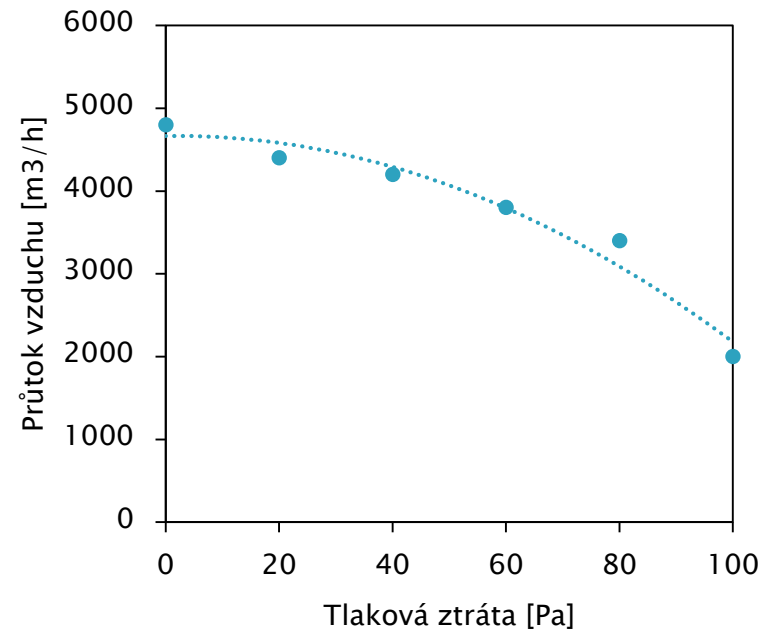
Vnější průměr trubek	D	7	mm
Tloušťka stěny	str	1.00	mm
Vnitřní průměr trubek	d	5.20	mm
Průměr žebra	Dz	26.00	mm
Výška žebra	hz	9.457	mm
Tloušťka žebra	δ	0.20	mm
Rozteč žeber	sz	5.00	mm
Délka trubek	l	0.90	m
Počet řad trubek	z2	6	
Rozměry vzduchového kanálu	a	0.90	m
	b	0.90	m
Přímá rozteč trubek	s1	25.00	mm
Podélná rozteč	s2	21.650	mm
Počet okruhů	No	12	-
Počet řad	Nr	6	-
Počet trubek nad sebou	Nh	36	-

# Charakteristiky ventilátoru

Příkon ventilátoru jako funkce průtoku vzduchu



Průtok vzduchu jako funkce tlakového poměru



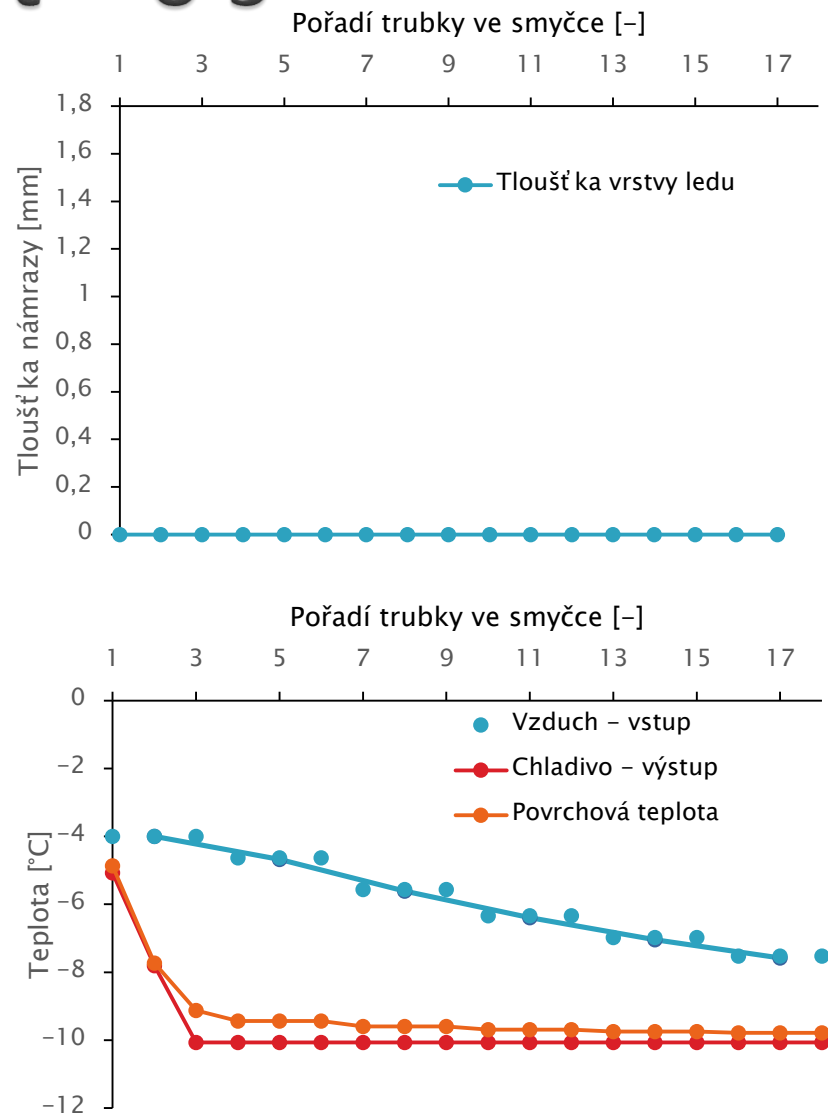
# Ostatní komponenty

- ▶ Kompresor
  - Scroll výkonnost o zdvihovém objemu  $30,5 \text{ cm}^3$
- ▶ Elektronický expanzní ventil
  - Přehřátí chladiva udržované na výparníku  $5 \text{ K}$
- ▶ Kondenzátor
  - Velikost součinu  $UA = 2500 \text{ W/K}$

# Výsledky – v čase $\tau = 0$ s

Chladicí výkon výparníku	7.25	kW
Topný výkon kondenzátoru	10.09	kW
Příkon kompresoru	2.84	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.44</b>	-

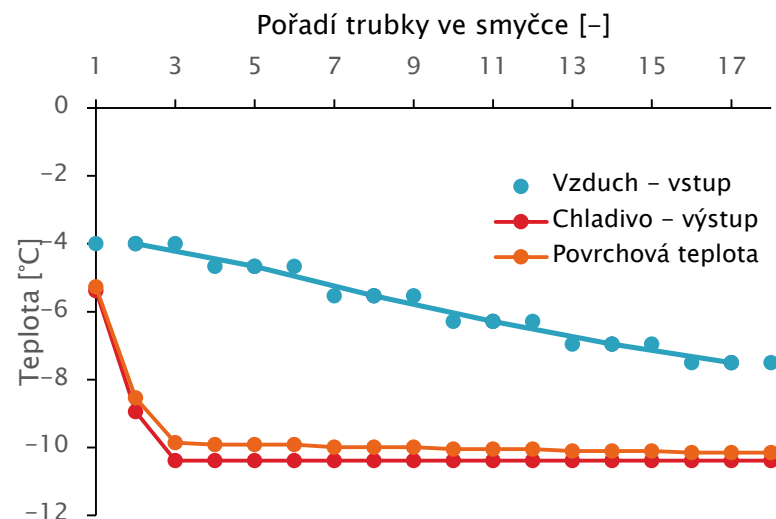
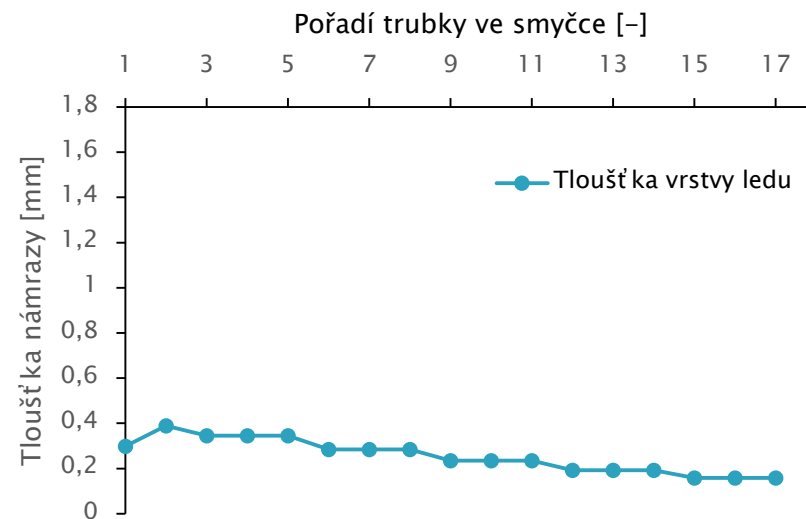
Celkový předaný chladicí výkon	7.3	kW
Výkon v citelném teple	5.1	kW
Výkon v latentním teple	2.2	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	26.2	Pa
Objemový průtok vzduchu	3484	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	1.27	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	3.139	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod



# Výsledky – v čase $\tau = 1200$ s

Chladicí výkon výparníku	7.16	kW
Topný výkon kondenzátoru	9.99	kW
Příkon kompresoru	2.83	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.42</b>	-

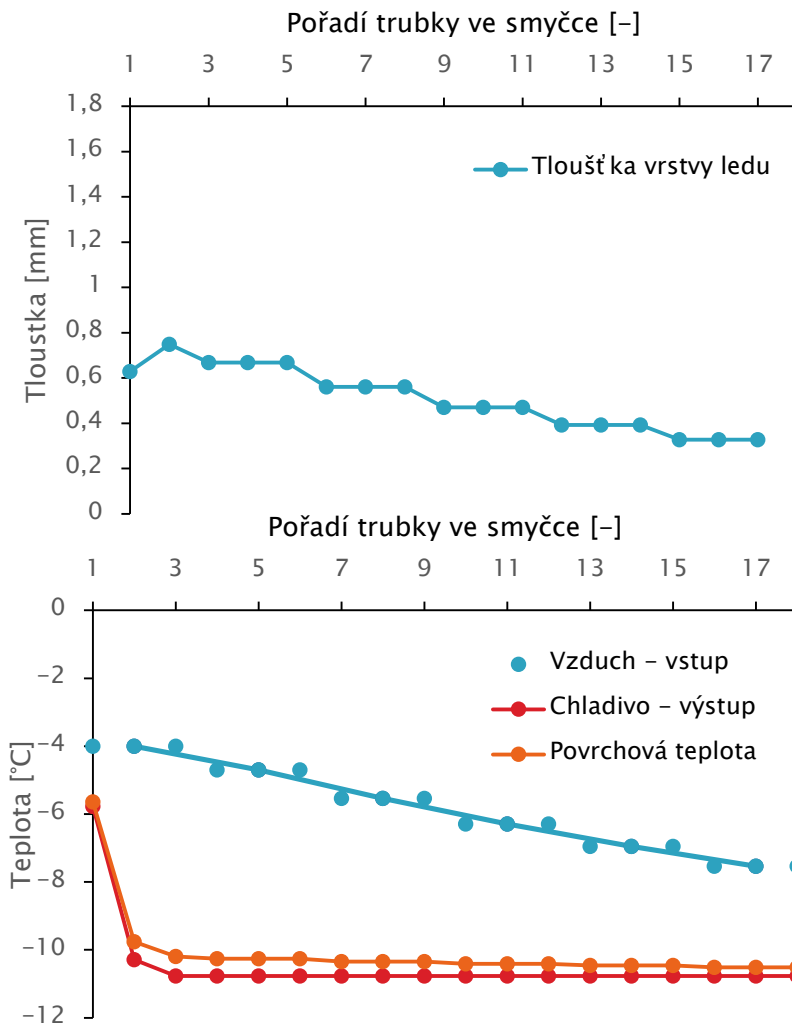
Celkový předaný chladicí výkon	7.1	kW
Výkon v citelném teple	5.0	kW
Výkon v latentním teple	2.1	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	32.3	Pa
Objemový průtok vzduchu	3431	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	1.25	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	3.066	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod



# Výsledky – v čase $\tau = 2400$ s

Chladicí výkon výparníku	7.05	kW
Topný výkon kondenzátoru	9.86	kW
Příkon kompresoru	2.82	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.39</b>	-

Celkový předaný chladicí výkon	7.0	kW
Výkon v citelném teple	5.0	kW
Výkon v latentním teple	2.1	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	42.4	Pa
Objemový průtok vzduchu	3345	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	1.22	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	2.997	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod

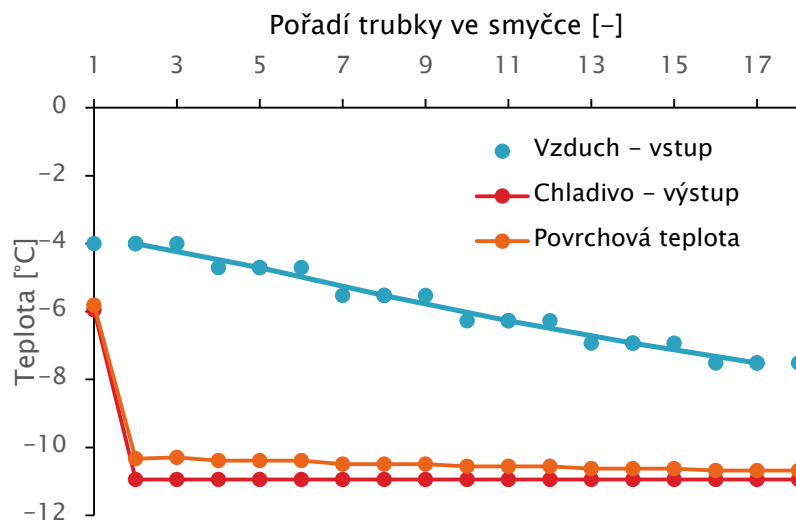
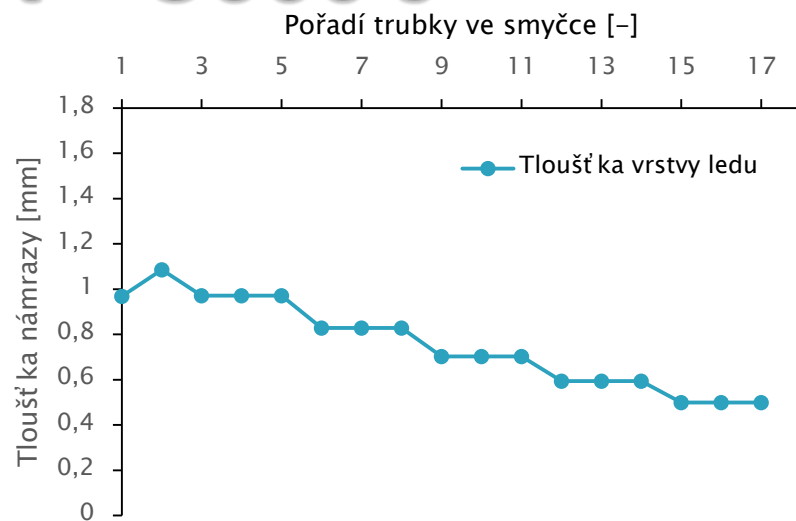




# Výsledky – v čase $\tau = 3600$ s

Chladicí výkon výparníku	6.62	kW
Topný výkon kondenzátoru	9.19	kW
Příkon kompresoru	2.56	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.46</b>	-

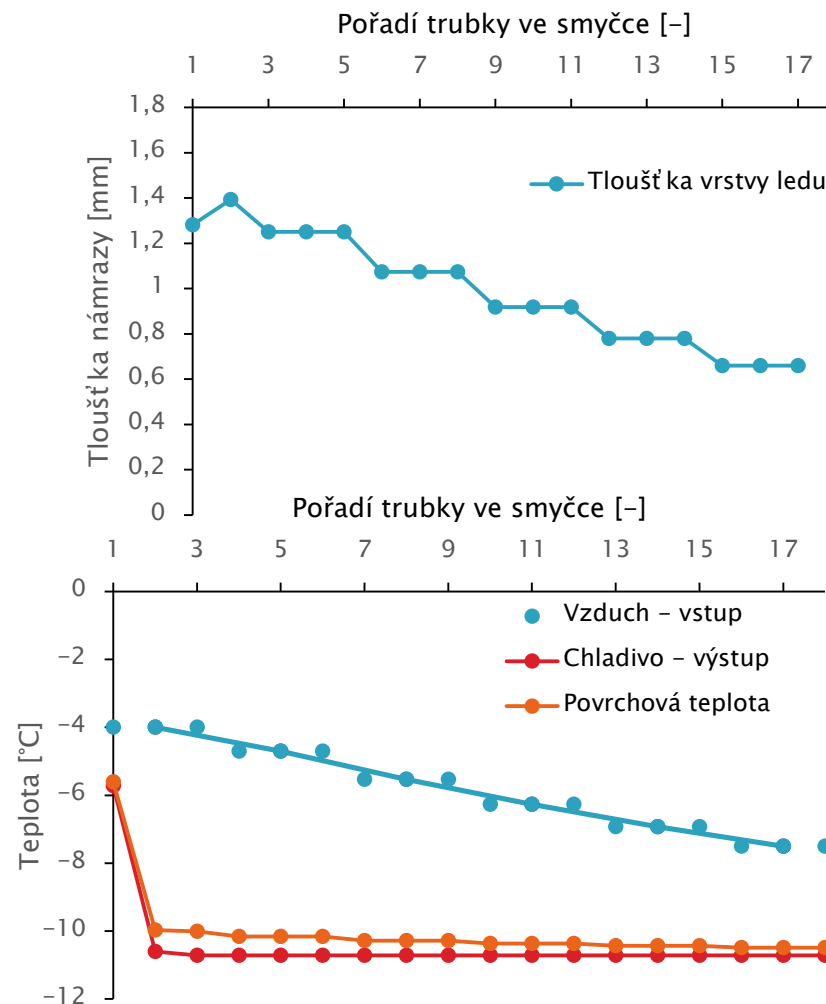
Celkový předaný chladicí výkon	6.6	kW
Výkon v citelném teple	4.7	kW
Výkon v latentním teple	2.0	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	57.3	Pa
Objemový průtok vzduchu	3146	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	1.14	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	2.802	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod



# Výsledky – v čase $\tau = 4800$ s

Chladicí výkon výparníku	5.58	kW
Topný výkon kondenzátoru	7.58	kW
Příkon kompresoru	1.99	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.62</b>	-

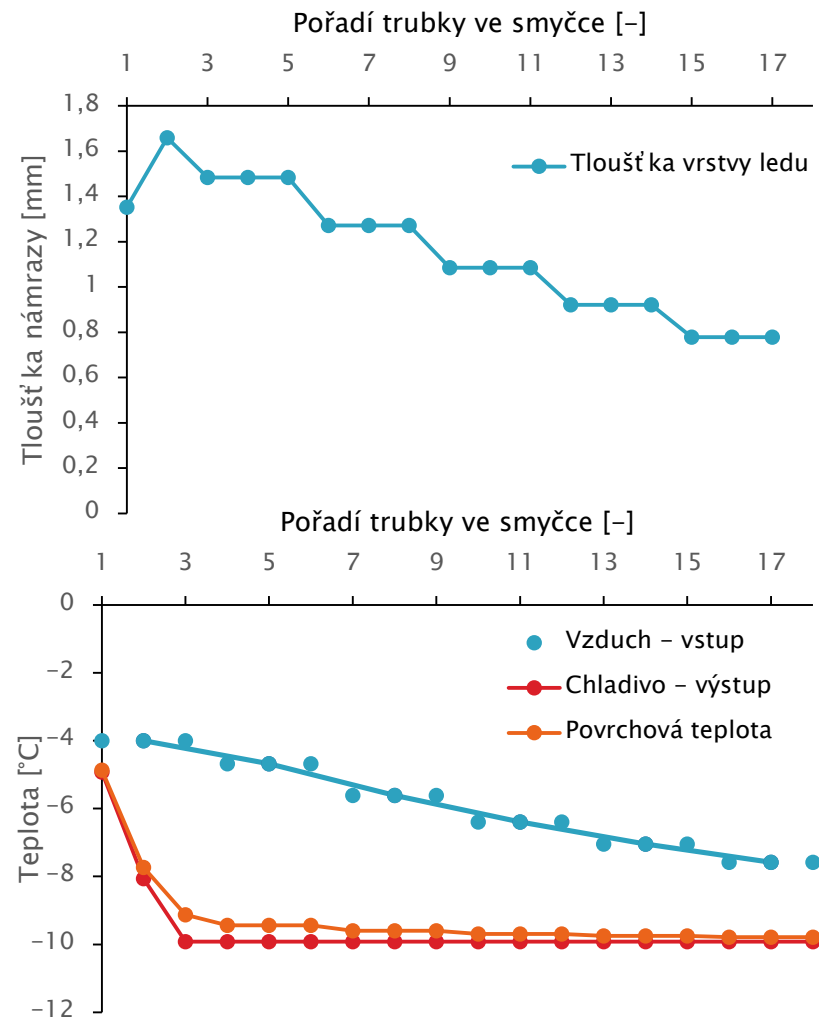
Celkový předaný chladicí výkon	5.6	kW
Výkon v citelném teple	3.9	kW
Výkon v latentním teple	1.7	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	75.7	Pa
Objemový průtok vzduchu	2668	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	0.97	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	2.378	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod



# Výsledky – v čase $\tau = 6000$ s

Chladicí výkon výparníku	3.76	kW
Topný výkon kondenzátoru	5.00	kW
Příkon kompresoru	1.25	kW
Příkon ventilátoru	0.13	kW
<b>Chladicí faktor</b>	<b>2.73</b>	-

Celkový předaný chladicí výkon	3.8	kW
Výkon v citelném teple	2.6	kW
Výkon v latentním teple	1.1	kW
Tlaková ztráta na straně vzduchu	92.6	Pa
Objemový průtok vzduchu	1780	m <sup>3</sup> /h
Hmotnostní průtok vzduchu	0.65	kg/s
Teplota vzduchu na vstupu	-4.0	°C
Teplota vzduchu na výstupu	-8.0	°C
Příkon el. ventilátoru	0.132	kW
Přírůstek námrazy	1.637	kg/hod
Zkondenzováno vody	0.0	kg/hod

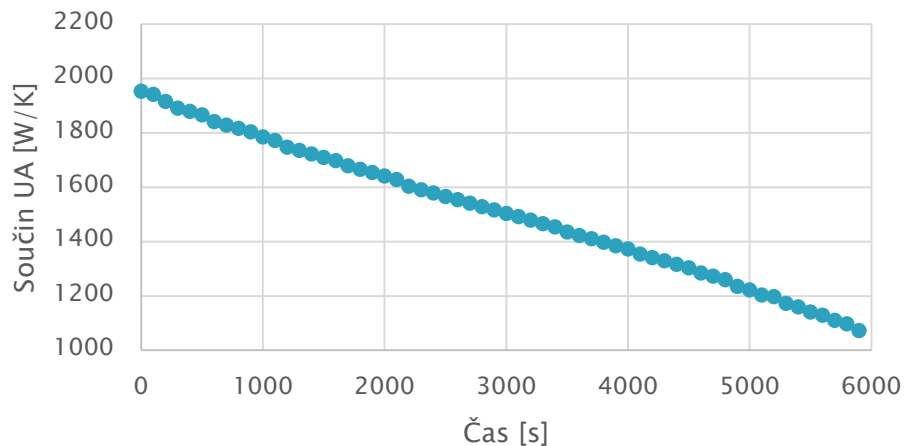


# Vyhodnocení

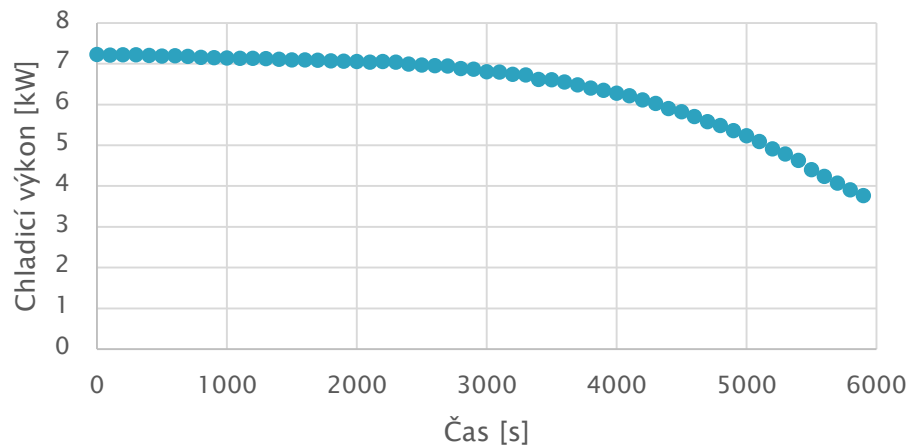
- ▶ Teplota vypařovací se téměř nemění
- ▶ Klesá výkon výparníku
- ▶ Klesají otáčky kompresoru
- ▶ Klesá součin UA výparník

# Vyhodnocení

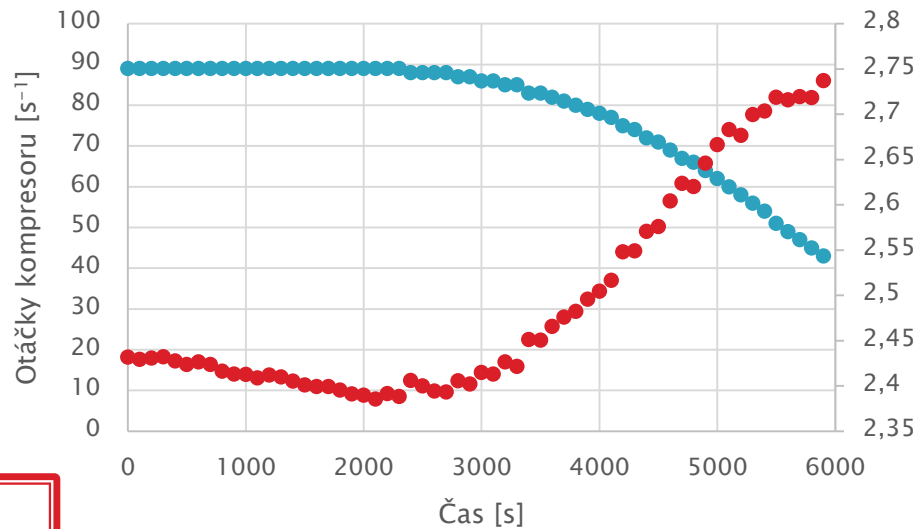
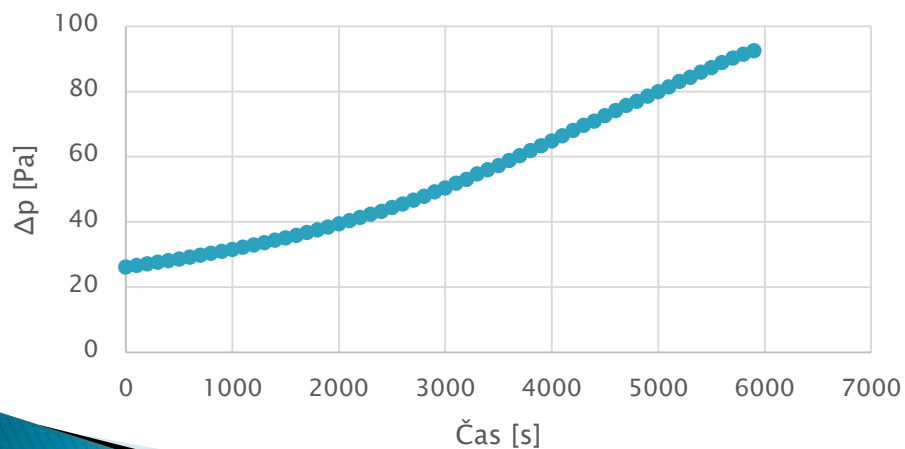
## AU vyparníku



## Clací výkon



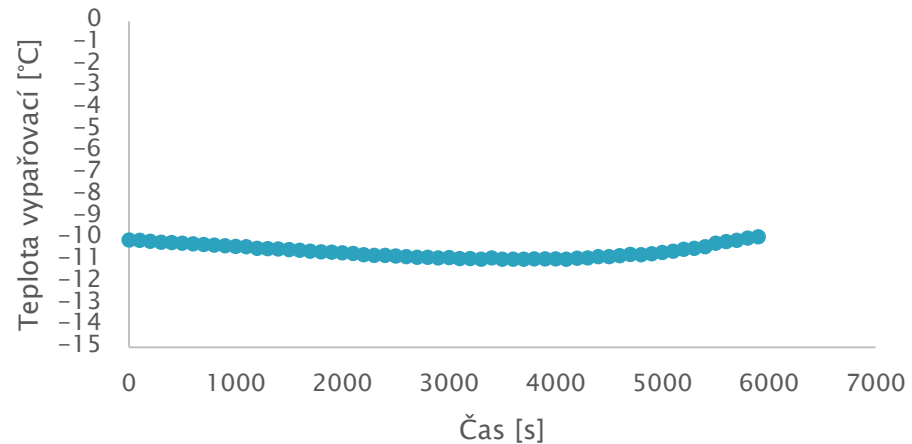
## Tlaková ztráta na straně vzduchu



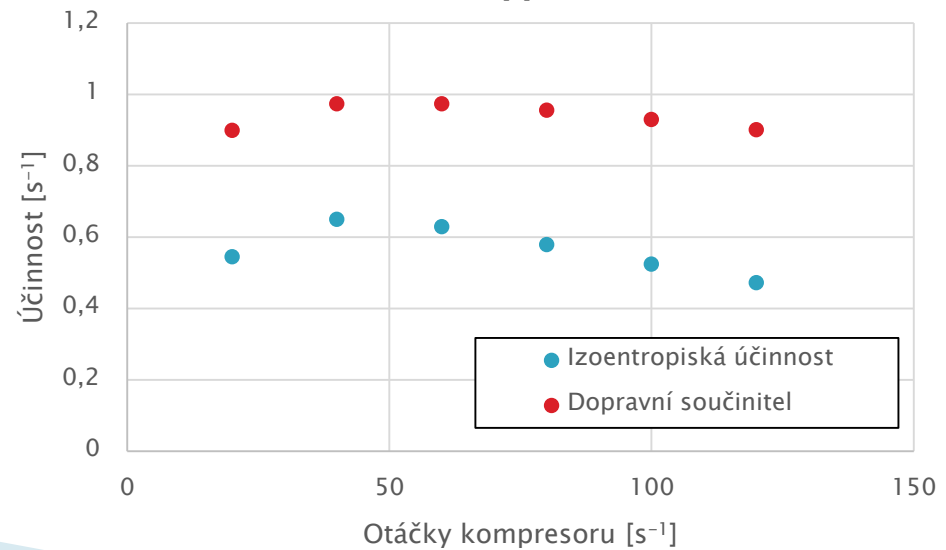
Proč roste  
chladičí faktor?

# Vyhodnocení

Teplota vypařovací



Charakteristika kompresoru

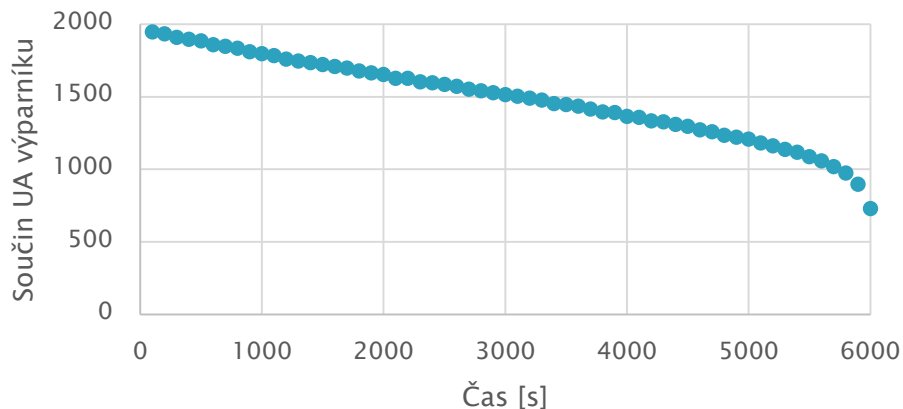


# Příklad 2

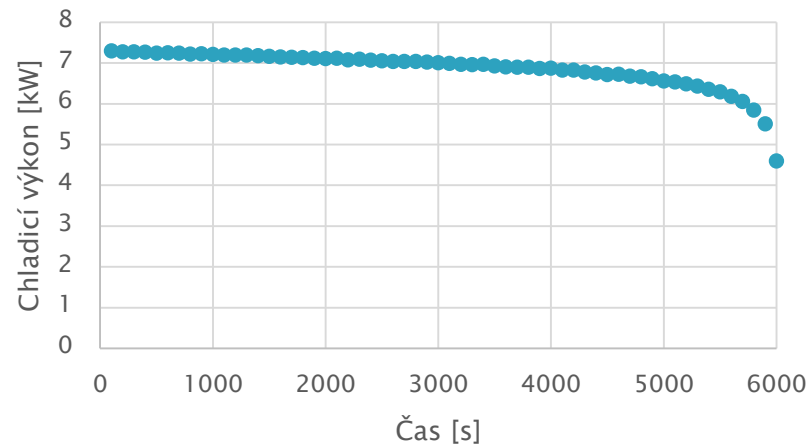
- ▶ Stejné zadání simulace
- ▶ Otáčky kompresoru se nemění
  - Bez regulace

# Vyhodnocení

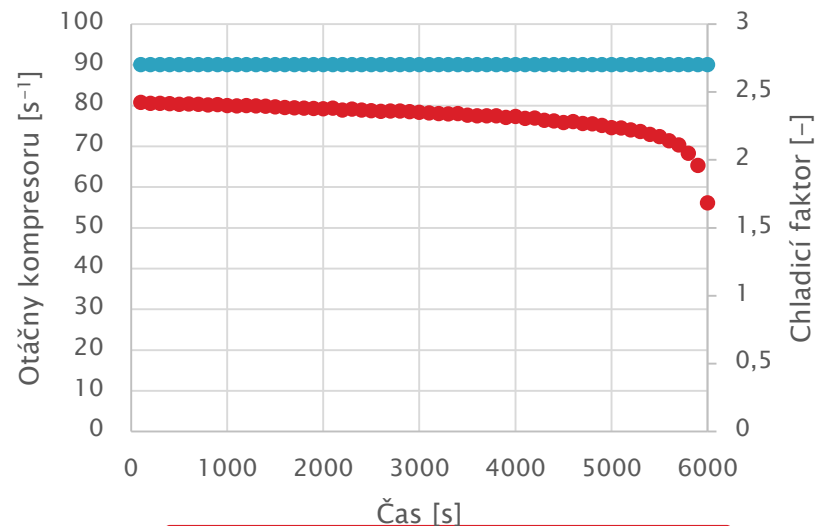
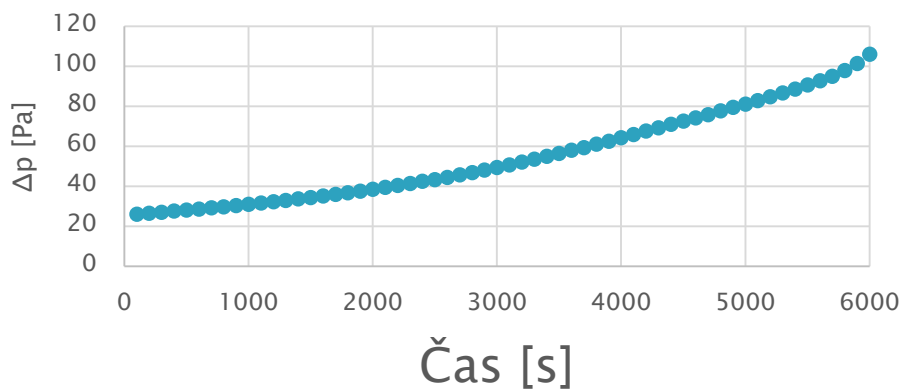
## AU výparníku



## Cladicí výkon



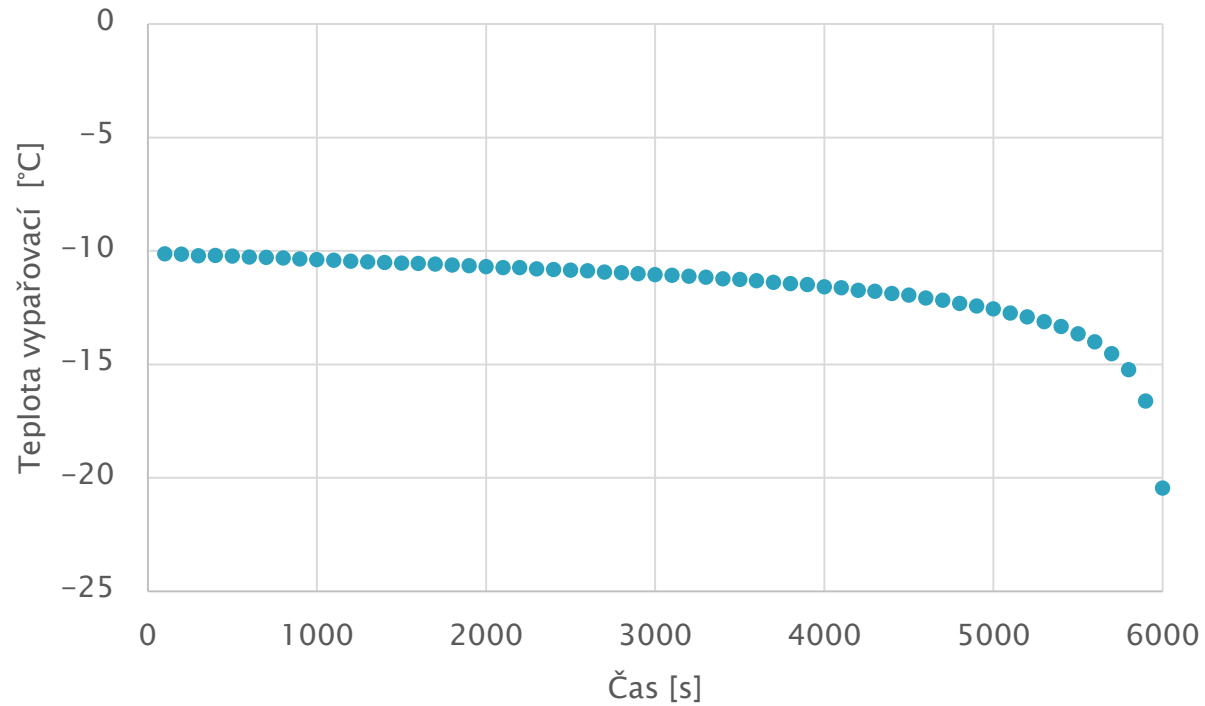
## Tlaková ztráta na straně vzduchu



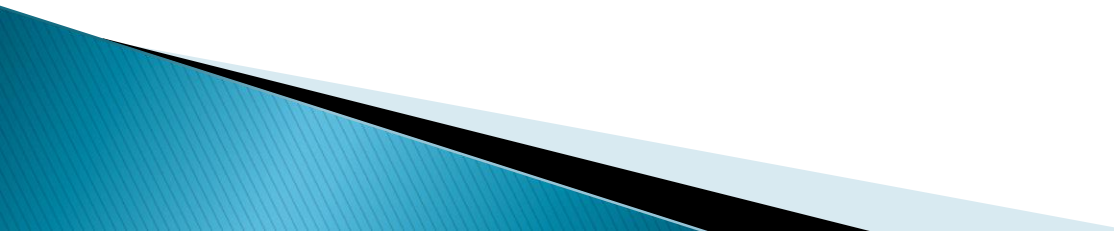
Chladicí faktor klesá



# Vyhodnocení



# Závěr

- ▶ U chladicího zařízení s modulovaným kompresorem není vhodné používat pro odtávání rozdíl mezi teplotou okolního vzduchu a teplotou vypařovací
  - ▶ Model lze použít pro popis dějů na výparníku
- 

# Odtávání

- ▶ Model vypočítává energii potřebnou pro odtávání námrazy
- ▶ V mezním případě lze dopočítat ideální dobu odtávání výparníku z ekonomické studie
  - Odtávání musí
    - ohřát námrazu a hmotu výparníku na 0 °C
    - odtát námrazu
- ▶ Dle modelu lze odhadnout dobu odtávání a energii potřebnou pro odtání námrazy

# Kalibrace modelu

- ▶ Matematický model byl vytvořen nedávno
- ▶ Zatím neověřován
- ▶ Kalibrace modelu
  - Měření teplot na trubkách výparníku
  - Měření příkonu kompresoru
  - Měření příkonu ventilátoru
  - Měření teplot a tlaků v okruhu chladiva

DALŠÍ PRÁCE



# Použití modelu

- ▶ Optimalizace konstrukce chladicího zařízení
  - Volba kompresoru
  - Volba a uspořádání výparníku pro konkrétní instalaci
  - Optimalizace regulace odtávání
- ▶ Predikce výkonových vlastností
  - Například u tepelných čerpadel optimalizace komponent pro maximální  $SCOP_{ON}$
  - Pro klimatizace  $SEER$
- ▶ Ověřování provozního chování včetně detekce poruch

# Použití modelu

Příklad přesnosti odhadu výkonových vlastností tepelného čerpadla v bodech podle normy ČSN EN 14511 a ČSN EN 14825. Byly známy:

- ▶ Kompresor s regulací otáček
- ▶ Hlavní rozměry a uspořádání výparníku
- ▶ Chladivo

Bod	Od výrobce			Parametrizace			Relativní odchylka		
	topný výkon	elektrický příkon	topný faktor	topný výkon	elektrický příkon	topný faktor	topný výkon	elektrický příkon	topný faktor
	[kW]	[kW]	[-]	[kW]	[kW]	[-]	[%]	[%]	[%]
7/35	7.5	1.6	4.7	7.5	1.6	4.7	0.0	0.7	-0.6
2/35	7.0	2.0	3.6	6.9	2.0	3.5	-1.6	0.7	-2.1
-7/35	10.1	3.9	2.6	10.0	4.0	2.5	-1.3	2.5	-3.6

**Děkuji za pozornost.**

ODBORNÁ KONFERENCE SCHKT- 26. LEDNA 2016, HOTEL STEP, PRAHA